

# Polarizador Circular basado en Estructura Quiral Metamaterial Asimétrica

Oscar Fernández, Álvaro Gómez y Angel Vegas

oscar.fernandez@unican.es, alvaro.gomez@unican.es, angel.vegas@unican.es

Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Edificio Ingeniería de Telecomunicación

Prof. Jose Luis García García. Plaza de la Ciencia S/N. 39005 Santander.

**Abstract-** Planar Chiral MetaMaterials structures, based on mutually twisted faces or conjugated faces, with  $C_4$  symmetry, may present high optical activity but low circular dichroism values. In this communication, an Asymmetric CMM structure with high circular dichroism is proposed. Due to its lack of  $C_4$  symmetry, the transmission coefficients depend on the incident wave polarization and display high transmission for one polarization but low transmission for the orthogonal one.

The proposed structure is then used to improve the radiation characteristics of a microstrip antenna. Taking advantage of the circular dichroism of the asymmetric chiral structure, the polarization of the radiated field can be modified, transforming the linear polarization of a basic microstrip antenna into circular polarization.

## I. INTRODUCCIÓN

Los metamateriales son compuestos materiales artificiales que presentan propiedades inusuales en la naturaleza, o bien amplifican las características que exhiben cada uno de los constituyentes por separado. De entre estos nuevos materiales, se destaca el subgrupo formado por los metamateriales quirales (Chiral MetaMaterial, CMM), caracterizado por presentar ángulos de rotación del plano de polarización elevados e índices de refracción negativos [1].

Las estructuras CMM implementadas en circuito impreso (Printed Circuit Board, PCB) [2] presentan gran interés gracias a su diseño plano y a su bajo coste de fabricación. En la literatura se han presentado diferentes diseños, los cuales se pueden concentrar en dos grandes grupos. El primero lo forman las estructuras de “giro mutuo”, las cuales presentan un patrón, quiral [2] o aquiral [3], con simetría  $C_4$  y un giro relativo entre ambas caras del PCB (Fig. 1a). El segundo grupo, denominado de estructuras “de caras conjugadas”, comprende diseños con simetría  $C_4$  en los que el diseño de una de las caras es el enantiómero de la otra, con o sin rotación (Fig. 1b) [4]-[6].

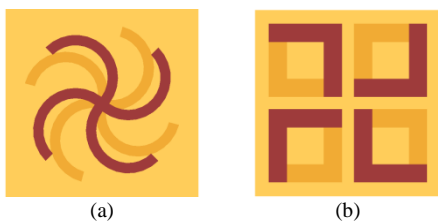


Fig. 1. Ejemplo de (a) estructuras de tipo giro mutuo (rosetas [2]) y (b) estructura conjugada (“en forma de L” [4])

La mayoría de las estructuras CMM presentes en la literatura, por ejemplo [2]-[5], se orientan a incrementar la

actividad óptica sin modificar el dicroísmo circular. Sin embargo, son pocas las referencias, [6,7], que se centran en el aumento del dicroísmo circular.

En este trabajo, se propone una estructura CMM Asimétrica (Asymmetric CMM, ACCM) para conseguir valores de dicroísmo circular elevados. Debido a la ausencia de simetría  $C_4$ , los coeficientes de transmisión dependen de la orientación de la polarización de la onda incidente. Esta estructura se diseña para presentar alta transmisión para una de las polarizaciones lineales pero baja transmisión para la polarización ortogonal. Este tipo de metasuperficies puede utilizarse para discriminar entre polarización lineal vertical u horizontal. Además, la gran diferencia entre los coeficientes de transmisión produce valores de dicroísmo circular superiores a 0.5.

En [8], los autores utilizan la estructura de rosetas con giro mutuo, [2], para desarrollar superestratos de antenas microstrip. Gracias al efecto de focalización producido por el índice de refracción negativo, [9], estos superestratos mejoran la directividad de la antena y producen un campo radiado con polarización circular. En [10] los autores estudian el efecto de una cobertura basada en la estructura gammadion conjugada simétrica sobre una antena sencilla con polarización elíptica. Dicha cobertura permite transformar la polarización elíptica en polarización circular. En esta comunicación se estudia el comportamiento de un nuevo superstrato formado por la estructura ACCM que se propone. Este superstrato aprovecha el dicroísmo circular producido por la asimetría de la estructura para conseguir un campo radiado con polarización circular a partir de una antena microstrip con polarización lineal.

El estudio numérico de las estructuras se ha realizado con el simulador 3D EMPro de Keysight Technologies, utilizando los motores de diferencias finitas en el dominio del tiempo y elementos finitos en el dominio de la frecuencia.

## II. ESTRUCTURAS CMM SIMÉTRICAS Y ASIMÉTRICAS

En este apartado se presenta una nueva estructura quiral asimétrica diseñada para incrementar el dicroísmo circular. El estudio de los efectos de la nueva estructura asimétrica propuesta se realiza sobre la base ya conocida del comportamiento de la estructura gammadion conjugada simétrica [5] (Fig. 2), perteneciente al conjunto de estructuras de caras conjugadas.

Por conveniencia en cuanto a la utilización del nuevo diseño en aplicaciones de imaging [8] se ha escogido la banda W (75-111 GHz) como banda de funcionamiento. Así

tenemos entonces que la estructura simétrica con la que se inicia el estudio tiene los siguientes parámetros geométricos:  $l = 0.5$  mm,  $w = 40$   $\mu$ m y  $g = 0.675$  mm. El sustrato tiene un grosor de 100  $\mu$ m con una constante dieléctrica de  $\epsilon_r = 2.4$  y  $\tan \delta = 0.0001$ . Las metalizaciones presentan 1  $\mu$ m de grosor.

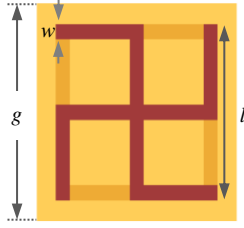


Fig. 2. CMM Cruz gamada conjugada simétrica

Al incidir una onda plana con polarización lineal de manera normal sobre el CMM, el correspondiente campo transmitido con polarización lineal se obtiene a partir de la matriz de coeficientes de transmisión  $T_l$ ,

$$\begin{pmatrix} E_x^t \\ E_y^t \end{pmatrix} = T_l \begin{pmatrix} E_x^i \\ E_y^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{xx} & t_{xy} \\ t_{yx} & t_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x^i \\ E_y^i \end{pmatrix} \quad (1)$$

Debido a la simetría  $C_4$  se verifica que  $t_{xx} = t_{yy}$  y  $t_{xy} = -t_{yx}$  como se puede ver en la Fig. 3 para el caso particular que nos ocupa. Se puede ver también en dicha figura, como, en torno a 99 GHz, los coeficientes de transmisión cros-polar son muy superiores a los coeficientes co-polar lo que implica un fuerte giro en el plano de polarización de la onda transmitida, es decir, alta actividad óptica.

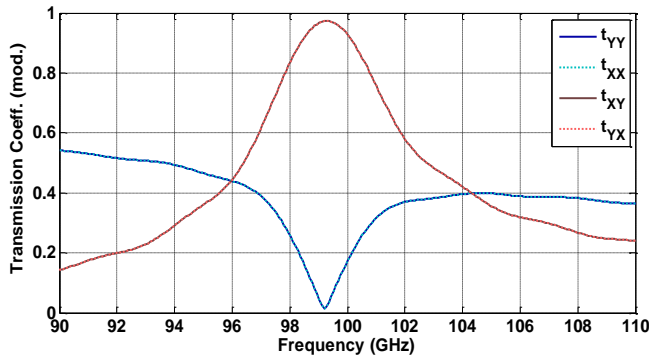


Fig. 3. Coeficientes de transmisión lineales de estructura CMM gammadion conjugada simétrica

Ahora bien, en un medio quiral ilimitado, la solución general para la propagación de ondas electromagnéticas se puede ver como superposición de dos ondas circulares  $E_+$  (RHCP) y  $E_-$  (LHCP). De acuerdo con esto, los campos transmitidos  $E_+^t$  y  $E_-^t$ , se relacionan con el campo incidente linealmente polarizado,  $E_x^i$  y  $E_y^i$ , a través de la matriz de transmisión  $T_{cl}$ , [11].

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} E_+^t \\ E_-^t \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} E_x^t + jE_y^t \\ E_x^t - jE_y^t \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} t_{xx} + jt_{yx} & t_{xy} + jt_{yy} \\ t_{xx} - jt_{yx} & t_{xy} - jt_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x^i \\ E_y^i \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} t_{+x} & t_{+y} \\ t_{-x} & t_{-y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x^i \\ E_y^i \end{pmatrix} = T_{cl} \begin{pmatrix} E_x^i \\ E_y^i \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

Gracias a la simetría  $C_4$  la matriz  $T_{cl}$  se simplifica a

$$T_{cl} = \begin{pmatrix} t_{+x} & jt_{+x} \\ t_{-x} & -jt_{-x} \end{pmatrix} \quad (3)$$

De esta manera, los coeficientes de transmisión son independientes de la orientación de la polarización lineal de la onda incidente ( $|t_{\pm x}| = |t_{\pm y}|$ ). Además, como puede verse en Fig. 4, los coeficientes de transmisión,  $|t_{+x}|$  y  $|t_{-x}|$  presentan valores muy similares. Esto implica que los campos transmitidos  $E_+^t$  y  $E_-^t$  presentarán amplitudes similares y por tanto el dicroísmo circular de la estructura simétrica será muy bajo, próximo a cero.

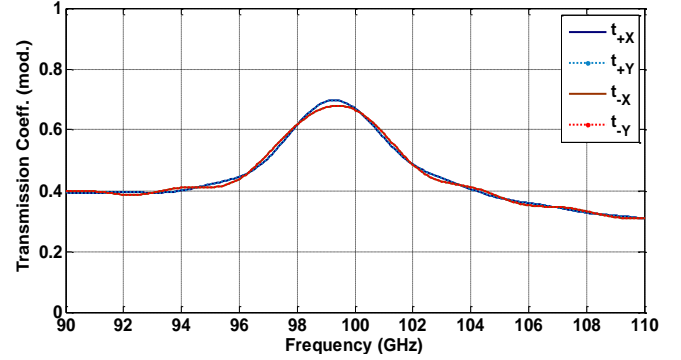


Fig. 4. Coeficiente de transmisión lineal - circular de la estructura gammadion conjugada simétrica.

Para incrementar el dicroísmo circular se diseña una estructura ACMM (Fig. 5) basada en la gammadion conjugada anterior. Esta estructura presenta una celda unidad de tipo rectangular, situándose el lado menor en el eje x. Se utiliza el mismo sustrato y los parámetros geométricos para trabajar en la banda W son los siguientes:  $l_1 = 0.430$  mm,  $l_2 = 0.7$  mm,  $w = 40$   $\mu$ m,  $g_1 = 0.6$  mm y  $g_2 = 0.86$  mm.

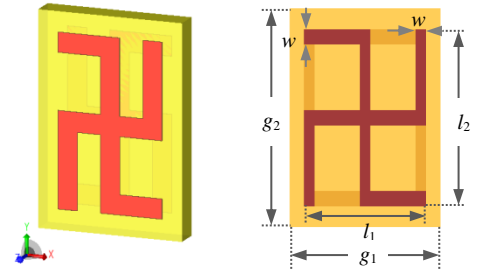


Fig. 5. Estructura CMM gammadion conjugada Asimétrica (ACMM)

Al romper la simetría  $C_4$  los coeficientes de transmisión dependen de la orientación de la onda incidente linealmente polarizada. De hecho, la estructura propuesta produce una gran diferencia entre los coeficientes de transmisión co-polar  $t_{xx}$  y  $t_{yy}$ . Uno de los parámetros geométricos más influyentes en esta diferencia es la anchura de la pista,  $w$ . Al aumentar  $w$  la diferencia entre  $t_{xx}$  y  $t_{yy}$  es mayor en un ancho de banda también mayor. Para  $w = 40$   $\mu$ m, la diferencia  $\Delta = |t_{xx}| - |t_{yy}|$  es mayor de 0.5 en el ancho de banda entre 97 y 99 GHz, con un valor máximo de 0.6 (Fig. 6a). Sin embargo, para  $w = 80$   $\mu$ m, en la banda entre 100 y 104.5 GHz,  $|t_{yy}| < 0.1$  mientras que  $|t_{xx}| > 0.75$ , con una diferencia máxima de  $\Delta = 0.7$  (Fig. 6b). Por tanto, si la polarización de la onda incidente es paralela al lado corto de la celda unidad, la onda se transmite, mientras que si es perpendicular la onda se refleja. Este

comportamiento puede utilizarse para ayudar a discriminar campos electromagnéticos en función de la orientación de la polarización.

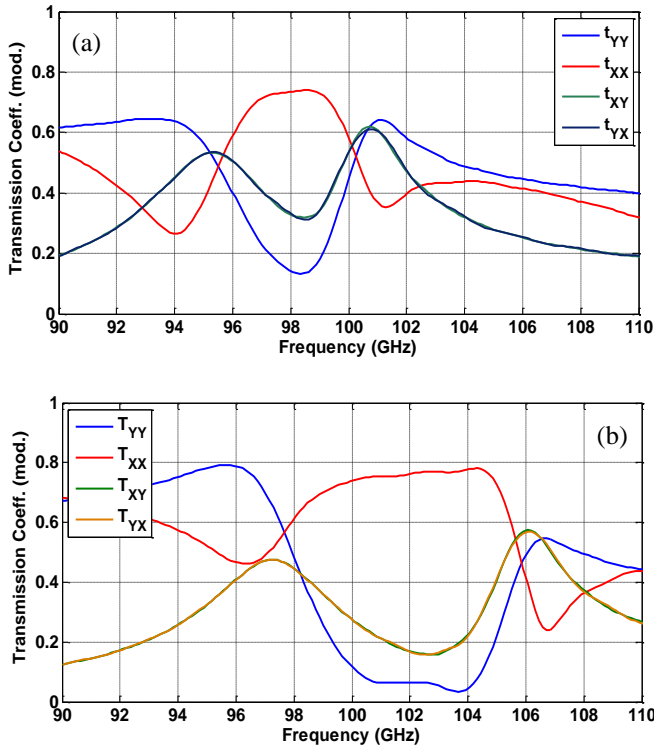


Fig. 6. Coeficientes de transmisión lineales del ACMM para (a)  $w = 40\mu\text{m}$  y (b)  $w = 80\mu\text{m}$

Los campos transmitidos  $E_+^t$  y  $E_-^t$  también dependen de la orientación de la polarización lineal del campo incidente. Cuando la polarización es paralela al lado largo de la estructura, es decir según el eje  $y$ , ambas ondas se transmiten con un coeficiente de transmisión inferior a 0.7 (Fig. 7). Sin embargo, cuando la incidencia es paralela al lado corto, los coeficientes de transmisión son muy diferentes.

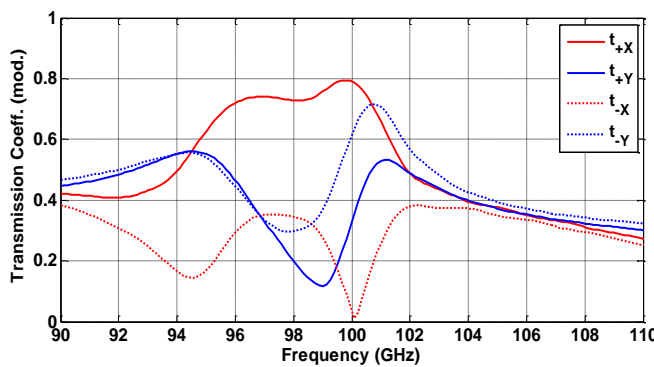


Fig. 7. Coeficientes de transmisión lineal a circular para  $w = 40\mu\text{m}$

En la Fig. 7 se muestra el comportamiento de la estructura ACMM en la banda de frecuencia 90-110 GHz. Observando la figura, cabe resaltar las situaciones a las frecuencias de 94.5 y 100.1 GHz. A esas frecuencias el coeficiente de transmisión de la componente circular a izquierdas (-), línea roja punteada, es muy bajo y por tanto la estructura se comporta como un polarizador circular a derechas (+) para la situación de incidencia según el eje  $x$  (paralelo al lado corto). La mejor situación en este sentido se consigue a 100.1 GHz.

Ahora bien, a 100.1 GHz, los coeficientes de transmisión lineales copolar y crosplar son iguales (ver Fig. 6a) pero están desfasados  $90^\circ$ ,  $t_{yx} = t_{xx} \cdot e^{-j\pi/2} = t_{xx} \cdot e^{-j\pi/2}$ . Con estos valores y según (2) los coeficientes de transmisión  $t_{+x}$  y  $t_{-x}$  se pueden poner como

$$\begin{pmatrix} t_{+x} \\ t_{-x} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} t_{xx} + jt_{yx} \\ t_{xx} - jt_{yx} \end{pmatrix} = \sqrt{2} \begin{pmatrix} t_{xx} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Por tanto, de (4) se puede extraer que cuando el campo incidente es  $E_x$ , la estructura ACMM sólo transmite la componente  $E_+^t$ . Como resultado, la estructura actúa como un polarizador circular, transformando una onda linealmente polarizada  $E_x$  en una onda circularmente polarizada  $E_+^t$ . Cuando la asimetría se introduce a lo largo del eje  $y$ , la onda transmitida será la componente circular  $E_-^t$ , que se obtiene a partir de una onda incidente  $E_y$ .

### III. COBERTURA DE ANTENA

Gracias al efecto de focalización producido por el índice de refracción negativo [9], un superestrato formado por CMM puede mejorar la directividad de la antena y producir un campo radiado con polarización circular. En [8] los autores presentan una cobertura formada por rosetas con giro mutuo que mejoran la directividad de la antena y producen un campo radiado con polarización circular. En [10] se estudia la cobertura formada por la estructura cruz gamada conjugada simétrica. Esta cobertura solo consigue polarización circular al colocarse sobre un parche con polarización elíptica.

En esta comunicación se presenta el comportamiento de un nuevo superestrato que aprovecha el diroísmo circular producido por la asimetría de la estructura ACMM.

Se utiliza una antena microstrip acoplada por slot (Fig. 8a) cuyas características se detallan en [12]. Esta antena radia un campo linealmente polarizado según el eje  $y$ .

Sobre esta antena, se coloca un superestrato formado por el CMM asimétrico presentado en el apartado anterior. Para que el metamaterial se comporte como polarizador circular, se orienta la celda unidad con su lado corto en el mismo sentido que la polarización lineal.

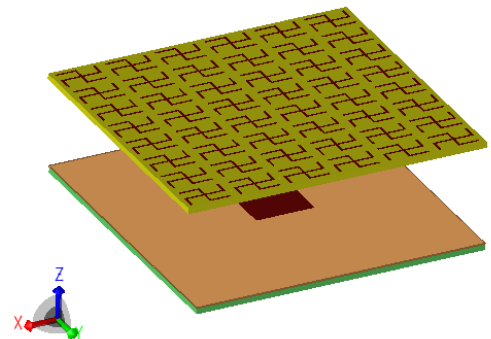


Fig. 8. Antena parche microstrip con cobertura ACMM

Uno de los parámetros geométricos críticos en el comportamiento del conjunto radiante (antena con cobertura) es la separación entre el parche y el superestrato ( $d$ ). La Fig 9 muestra la ganancia de la antena para las componentes

circular a derechas ( $G_+$ ) y circular a izquierda ( $G_-$ ) así como la diferencia entre ambas ganancias ( $G_+ - G_-$ ) en función de  $d$ . Esta figura muestra como para  $d \leq 1.4$  mm, la diferencia entre ambas componentes es baja. Al alejar la cobertura del parche la diferencia entre ganancias aumenta. Esta mayor diferencia entre  $G_+$  y  $G_-$  se refleja en la relación axial (Axial Ratio, AR) (Fig. 10) del campo radiado por la antena. Para una separación  $d \geq 2$  mm el campo se considera circularmente polarizado dado que presenta  $AR < 3$  dB.

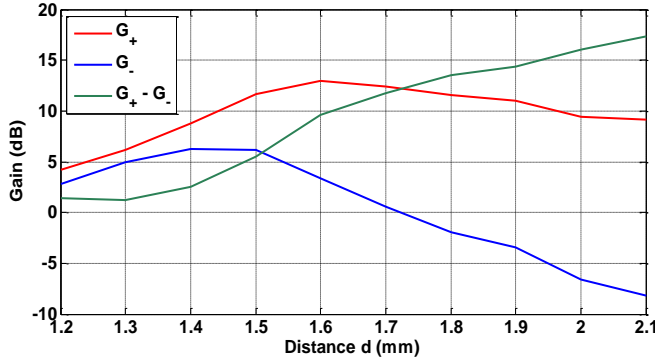


Fig. 9. Ganancia de la antena para las componentes circular a derechas ( $G_+$ ) y circular a izquierda ( $G_-$ ) y diferencia ( $G_+ - G_-$ )

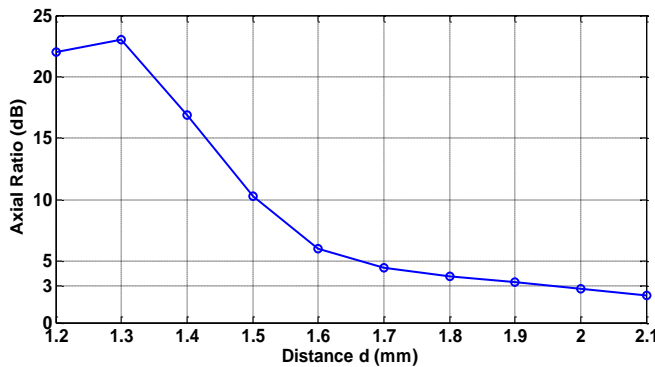


Fig. 10. Relación axial en función de la separación entre parche y cobertura

#### IV. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una comparación del comportamiento de un metamaterial quiral simétrico con una nueva estructura asimétrica propuesta. Mientras que la estructura simétrica presenta alta actividad óptica, el dicroísmo circular está próximo a cero. La estructura ACMM permite aumentar el dicroísmo circular por encima de 0.5. Como aplicación de esta estructura quiral asimétrica, se desarrolla un superstrato para una antena microstrip. Ajustando la separación entre el parche y el superstrato es posible conseguir, a partir de una antena con polarización lineal, un campo radiado con polarización circular.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España a través de los proyectos de investigación CONSOLIDER CSD2008-00066 EMET y TEC2014-55463-C3-3-P.

#### REFERENCIAS

- [1] J. B. Pendry, "A chiral route to negative refraction", *Science*, vol. 306, no. 5700, pp. 1353-1355, Nov. 2004.
- [2] E. Plum, J. Zhou, J. Dong, V. A. Fedotov, T. Koschny, C. M. Soukoulis, and N. I. Zheludev, "Metamaterial with negative index due to chirality", *Phys. Rev. B*, Vol. 79, 035407, Jan. 2009.
- [3] J. Zhou, J. Dong, B. Wang, T. Koschny, M. Kafesaki, and C. M. Soukoulis, "Negative refractive index due to chirality", *Phys. Rev. B*, Vol. 79, 121104, 2009.
- [4] J. Li, F. Q. Yang, and J. F. Dong, "Design and simulation of l-shaped chiral negative refractive index structure", *Progress In Electromagnetics Research*, Vol 116, 395-508, May 2011.
- [5] R. Zhao, L. Zhang, J. Zhou, Th. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Conjugated gammadion chiral metamaterial with uniaxial optical activity and negative refractive index", *Phys. Rev. B*, Vol. 83, 035105, Jan. 2011.
- [6] Y. Ye, X. Li, F. Zhuang, and S. W. Chang, "Homogeneous circular polarizers using a bilayered chiral metamaterial", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 99, 031111, Jul. 2011.
- [7] Y. Cheng, Y. Nie, L. Wu, and R. Z. Gong, "Giant circular dichroism and negative refractive index of chiral metamaterial based on split-ring resonators", *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 138, 421-432, 2013.
- [8] J. Gutiérrez, O. Fernández, J.P. Pascual, Á. Gómez, A. Tazón, A. Vegas and Á. Mediavilla, "W-Band Linear Array of Planar Antennas and Chiral Metamaterial Cover", *Int. J. Microw. Opt. Techn.*, vol. 9, no. 6, pp. 384-393, Nov. 2014.
- [9] C. Monzon and D. W. Forester, "Negative Refraction and Focusing of Circularly Polarized Waves in Optically Active Media", *Physical Review Letters*, vol. 95, no. 12, pp. 123904, Sep. 2005.
- [10] O. Fernández, Á. Gómez and A. Vegas, "Parametric study of chiral metamaterial structures for enhancing antennas features," *XXIX Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI 2014)*, Valencia, 3-5 Sep. 2014.
- [11] C. Menzel, C. Rockstuhl, F. Lederer, "Advanced Jones Calculus for the classification of periodic metamaterials", *Phys. Rev. A*, Vol. 82, No. 5, 053811, Nov. 2010.
- [12] O. Fernández, A. Gómez, J. Gutiérrez, A. Tazón, A. Vegas and J. P. Pascual, "Enhancement of the radiation properties of a linear array of planar antennas with a chiral metamaterial cover", *Electron Devices (CDE), 2013 Spanish Conference on*, pp.223-226, 12-14 Feb. 2013.